

①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 197 32 513 A 1**

⑤ Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**H 01 L 41/24**  
B 32 B 7/12

⑲ Aktenzeichen: 197 32 513.0  
⑳ Anmeldetag: 29. 7. 97  
㉑ Offenlegungstag: 18. 2. 99

⑦1 Anmelder:

Eurocopter Deutschland GmbH, 80993 München,  
DE

⑦2 Erfinder:

Bansemir, Horst, Dr., 81825 München, DE;  
Emmerling, Stefan, 82024 Taufkirchen, DE

⑤6 Entgegenhaltungen:

DE 40 25 618 A1  
US 56 32 841  
US 49 22 096

DE-Z.: Industrieanzeiger 48-49/95, S.38-40;

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Verfahren zur Herstellung einer Verbundstruktur

⑤7 Das Verfahren zur Herstellung einer Verbundstruktur zur Ansteuerung von Rotoren für Hubschrauber oder von Aktuatoren, bei dem auf den beiden großen Seiten eines Piezoelementes in Form einer plattenförmigen Piezokeramik Elemente in Form von Faserverbundplatten aufgebracht werden, weist das Merkmal der Beaufschlagung der beiden Faserverbundplatten mit einer in ihrer Ebene angelegten Vorspannung auf, wonach die vorgespannten Faserverbundplatten mit der Piezokeramik über ihre gesamten Flächen verklebt werden; anschließend werden die Faserverbundplatten entlastet.

DE 197 32 513 A 1

DE 197 32 513 A 1

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer Verbundstruktur zur Ansteuerung von Rotoren für Hubschrauber oder von Aktuatoren, wobei auf den beiden großen Seiten eines Piezoelementes in Form einer plattenförmigen Piezokeramik Elemente in Form von Faserverbundplatten aufgebracht werden.

Verbundstrukturen aus plattenförmigen Elementen, zwischen denen eine plattenförmige Piezokeramik angeordnet ist, werden zunehmend als Bauteile für Hochgeschwindigkeitsaktuatoren z. B. zur aktiven Lärmbekämpfung verwendet; es besteht auch der Wunsch derartige Verbundstrukturen zur Ansteuerung der Rotoren von Hubschraubern zu verwenden.

Die üblicherweise dazu verwendeten plattenförmigen Piezokeramiken weisen eine hohe Zug- und Drucksteifigkeit sowie eine hohe Druckfestigkeit auf. Die Zugfestigkeit hingegen und die erreichbaren aktiven Dehnungen sind jedoch gering.

Diese Nachteile verhindern die erfolgreiche Verwendung von mit Piezokeramiken versehenen Verbundstrukturen zur Ansteuerung der Rotoren von Hubschraubern. Die Rotoren erzeugen nämlich durch Fliehkräfte bedingte Zugdehnungen; auch aus den Biegemomenten resultieren Zugdehnungen, die von den Piezokeramiken nicht getragen werden.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zur Herstellung einer Verbundstruktur zur Ansteuerung von Rotoren von Hubschraubern bzw. von Aktuatoren zu schaffen, bei denen einerseits die ausnutzbare aktive Dehnung sich nicht wesentlich verringert, andererseits aber bei Zugbelastung der Verbundstruktur die Piezokeramik nicht auf Zug beansprucht wird.

Ausgehend von einer Verbundstruktur der eingangs näher genannten Art erfolgt die Lösung dieser Aufgabe mit den im kennzeichnenden Teil des Anspruchs 1 angegebenen Verfahrensschritten; vorteilhafte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens sind in den Unteransprüchen beschrieben.

Erfindungsgemäß wird also vorgeschlagen, daß die plattenförmige Piezokeramik durch Verklebung mit den vorgepannten anisotropen oder isotropen Faserverbundplatten fest eingebettet wird. Diese Vorspannung in Form einer Dehnung kann durch Temperatureffekte, durch mechanische Lasten oder auch durch andere Effekte erhalten werden.

Nach der Herstellung der Verbundstruktur wird diese von den Vorspannungskräften entlastet. Dabei ist die Verbundstruktur auch durch die Bemessung der verwendeten Faserverbundplatten derart zu optimieren, daß die passiven Zugdehnungen getragen werden, jedoch die ausnutzbaren aktiven Dehnungen sich nicht wesentlich vermindern.

Im folgenden wird die Erfindung anhand der Zeichnung näher erläutert, in der ein vorteilhaftes Ausführungsbeispiel dargestellt ist; es zeigen:

Fig. 1 ein nach dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestelltes Ausführungsbeispiel einer Verbundstruktur;

Fig. 2 eine Draufsicht auf eine der Faserverbundplatten mit einer schematischen Darstellung der Vorspannung;

Fig. 3 einen senkrechten Schnitt durch eine Verbundstruktur während ihrer Herstellung, und

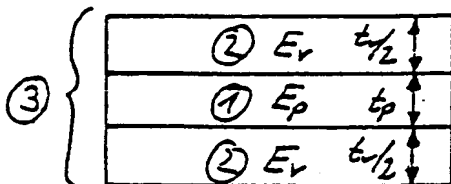
Fig. 4 eine grafische Darstellung der Vorspann- und Steifigkeitsverhältnisse in Abhängigkeit vom Wirkungsgrad der aktiven Dehnung.

Fig. 1 zeigt ein erfindungsgemäß hergestelltes Ausführungsbeispiel einer Verbundstruktur 3, die aus einer plattenförmigen Piezokeramik 1 besteht, die auf ihren beiden großen Seiten jeweils mit einer Faserverbundplatte 2 versehen ist. Bevor die Piezokeramik 1 mit den beiden Faserverbundplatten 2 verbunden wird, werden diese beiden Faserverbundplatten 2, wie es in Fig. 2 schematisch dargestellt ist, mit einer Vorspannung beaufschlagt, die sich in der Ebene der Faserverbundplatte 2 erstreckt, wobei hier die Faserverbundplatte z. B. durch Temperatureinwirkung oder durch mechanisch angreifende Lasten in Richtung der Pfeile  $F_1$ ,  $F_2$  gedehnt wird. Gegebenenfalls ist es auch möglich, die Faserverbundplatte 2 mit einer Vorspannung zu beaufschlagen, die sich nur in zwei entgegengesetzte Richtungen  $F_1$ ,  $F_1$  oder  $F_2$ ,  $F_2$  erstreckt.

Nach dem Anlegen der Vorspannung, wie sie durch die Pfeile  $F_1$ ,  $F_2$  schematisch gekennzeichnet ist, an die beiden Faserverbundplatten 2 werden diese mit der plattenförmigen Piezokeramik gemäß Fig. 3 z. B. unter Aufbringung von senkrecht auf die beiden Faserverbundplatten einwirkenden Anpressdrucke  $q$  verklebt. Nach Beendigung der Verklebung z. B. nach entsprechender Aushärtung des verwendeten Klebstoffes werden die beiden Faserverbundplatten 2 von den angelegten Vorspannkräften entlastet.

Die derart hergestellte Verbundstruktur, wie sie in Fig. 1 dargestellt ist, wird also während ihrer Herstellung derart vorgespannt, daß einerseits die ausnutzbare aktive Dehnung sich nicht wesentlich verändert, andererseits aber bei Zugbelastung der Verbundstruktur die Piezokeramik 1 nicht auf Zug beansprucht wird.

Damit die Verbundstruktur die passiven Zugdehnungen aushält, die ausnutzbaren aktiven Dehnungen sich jedoch nicht wesentlich vermindern, muß eine entsprechende Optimierung insbesondere der Faserverbundplatten erfolgen. Im folgenden werden entsprechende Dimensionsvorschriften für die erfindungsgemäße Herstellung der Verbundstruktur dargelegt, wobei die folgenden Bezeichnungen verwendet werden:



1 Piezokeramikelement

2 Vorspannelement

$E_p$  Elastizitätsmodul des Piezokeramikelements ①

$t_p$  Dicke des Piezokeramikelements ①

$E_v$  Elastizitätsmodul des Vorspannelements ②

$t_v$  Gesamtdicke der Vorspannelemente ②  
 $\epsilon_e$  Elastische Druckvorspannung des Piezoelements ①  
 $\epsilon_v$  Vordehnung des Vorspannmaterials ② (vor dem Verkleben)  
 $V = \epsilon_v / \epsilon_e$  Vorspannverhältnis

$$S = \frac{E_v \cdot t_v}{E_p \cdot t_p} \quad \text{Steifigkeitsverhältnis}$$

$\epsilon_p$  Aktive Dehnung des Piezomaterials ① allein  
 $\epsilon_a$  Aktive Dehnung der Verbundstruktur ③  
 $\eta \epsilon = \epsilon_v / \epsilon_p$  Wirkungsgrad der aktiven Dehnung der Verbundstruktur ③  
 $n = F/b$  Kraftfluß  
 $b$  Breite der Verbundstruktur ③

5

10

15

20

25

30

35

40

45

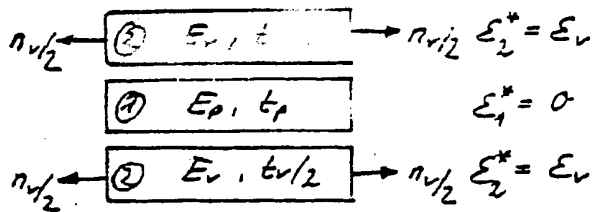
50

55

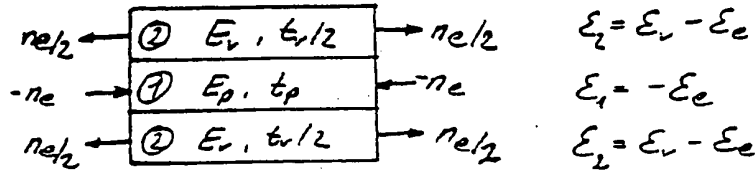
60

65

1. Elastische Vorspannung des Piezomaterials



Vor der Verklebung \*



Nach der Verklebung

$$\left. \begin{array}{l} \epsilon_2 = \epsilon_v - \epsilon_e \\ \epsilon_1 = -\epsilon_e \end{array} \right\} \epsilon_2 - \epsilon_1 = \epsilon_v \quad (1)$$

$$\epsilon_1 = \frac{-n_e}{E_p \cdot t_p} = -\epsilon_e \quad (2)$$

$$\epsilon_2 = \frac{n_e/2}{E_v \cdot t_v/2} = \frac{n_e}{E_v \cdot t_v} \quad (3)$$

$$\epsilon_2^* = \epsilon_v = \frac{n_v}{E_v \cdot t_v} \quad (4)$$

(2), (3), (4) in (1)

$$\frac{n_e}{E_v \cdot t_v} + \frac{n_e}{E_p \cdot t_p} = \frac{n_v}{E_v \cdot t_v} \quad (5)$$

$$\frac{n_e}{E_p \cdot t_p} \left( \frac{E_p \cdot t_p}{E_v \cdot t_v} + 1 \right) = \epsilon_v$$

$$\underline{\underline{\epsilon_e = \frac{\epsilon_v}{\frac{E_p \cdot t_p}{E_v \cdot t_v} + 1}}}$$

2. Aktive Dehnung der Verbundstruktur

Die aktive Dehnung der Verbundstruktur lässt sich analog zu Punkt 1. berechnen, wobei hierbei die Piezokeramik das durch den piezoelektrischen Effekt vorgedehnte Material ist, das die Schichten der Faserverbundplatten mit verformt.

$$\varepsilon_a = \frac{\varepsilon_p}{\frac{E_v \cdot t_v}{E_p \cdot t_p} + 1} \quad (6)$$

## 3. Auslegung

Aus Gleichung (6) läßt sich ein Wirkungsgrad berechnen, der definiert, welcher Anteil der aktiven Dehnung des Piezomaterials in der Verbundstruktur umgesetzt werden kann.

$$\eta_\varepsilon = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_p} = \frac{1}{\frac{E_v \cdot t_v}{E_p \cdot t_p} + 1} = \frac{1}{S + 1}$$

Aus dem gewünschten Wirkungsgrad ergibt sich das dafür einzuhaltende Steifigkeitsverhältnis  $S$  zwischen der vorgespannten Faserverbundplatte und der aktiven Piezokeramik. Mit der aufgrund der von außen angelegten Zugbelastung notwendigen Druckvorspannung  $\varepsilon_c$  der Piezokeramik läßt sich die dafür erforderliche Vordehnung  $\varepsilon_v$  der Faserverbundplatten aus der Gleichung (5) ermitteln:

$$\frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_c} = V = \frac{E_p \cdot t_p}{E_v \cdot t_v} + 1 = \frac{1}{S} + 1 = 1 + \frac{\eta_\varepsilon}{1 - \eta_\varepsilon}$$

Die Zusammenhänge zwischen  $\eta_\varepsilon$ ,  $S$  und  $V$  sind im Diagramm von Fig. 4 dargestellt, wobei links an der Ordinate das Vorspannverhältnis  $V$  abgetragen ist, auf der Abszisse der Wirkungsgrad der aktiven Dehnung und rechts an der Ordinate das Steifigkeitsverhältnis  $S$ .

Für einen gewünschten Wirkungsgrad  $\eta_\varepsilon = 70\%$  benötigt man ein Steifigkeitsverhältnis  $S = 0.43$  und ein Vorspannverhältnis  $V = 3.33$ .

Die vorgespannte Faserverbundplatte muß also 43% der Steifigkeit der Piezokeramik aufweisen und auf das 3,33-fache der gewünschten Druckvorspannung der Piezokeramik vorgedehnt werden.

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Herstellen einer Verbundstruktur zur Ansteuerung von Rotoren für Hubschrauber oder von Aktuatoren, wobei auf den beiden großen Seiten eines Piezoelementes in Form einer plattenförmigen Piezokeramik Elemente in Form von Faserverbundplatten aufgebracht werden, **dadurch gekennzeichnet**, daß die beiden Faserverbundplatten (2) mit einer in ihrer Ebene angelegten Vorspannung beaufschlagt werden, daß die so vorgespannten Faserverbundplatten (2) mit der Piezokeramik (1) über ihre gesamten Flächen verklebt werden und daß nach erfolgter Verklebung die vorgespannten Faserverbundplatten entlastet werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Faserverbundplatten mit einer in zwei entgegengesetzten Richtungen wirkenden Vorspannung  $F_1$  oder  $F_2$  beaufschlagt werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Faserverbundplatten mit in jeweils zwei mal zwei entgegengesetzten aber senkrecht aufeinander stehenden Richtungen wirkenden Vorspannungen  $F_1$  und  $F_2$  beaufschlagt werden.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Faserverbundplatten mit einer sie dehnenden Vorspannung beaufschlagt werden.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Verklebung der vorgespannten Faserverbundplatten mit der plattenförmigen Piezokeramik unter Anlegen eines senkrecht auf die großen Außenseiten der Faserverbundplatten wirkenden Anpressdrucks erfolgt.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Vorspannung durch Temperatureinwirkung auf die Faserverbundplatten erzeugt wird.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Vorspannung durch Anlegen mechanischer Zugkräfte an die Faserverbundplatten erzeugt wird.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

Fig.1

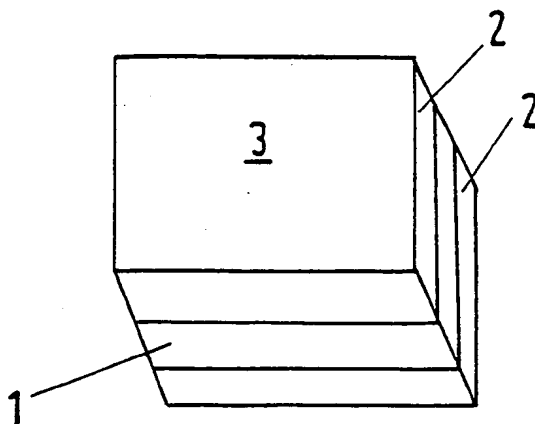


Fig2

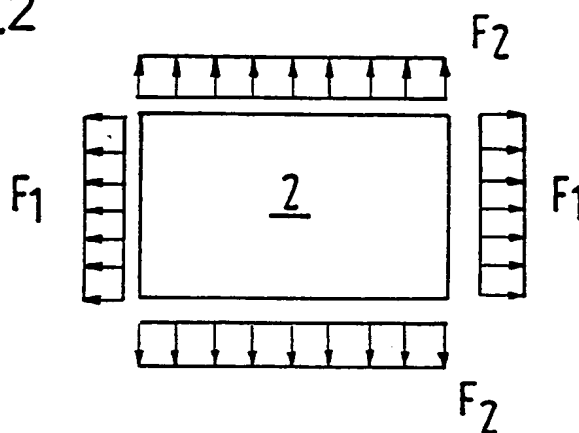
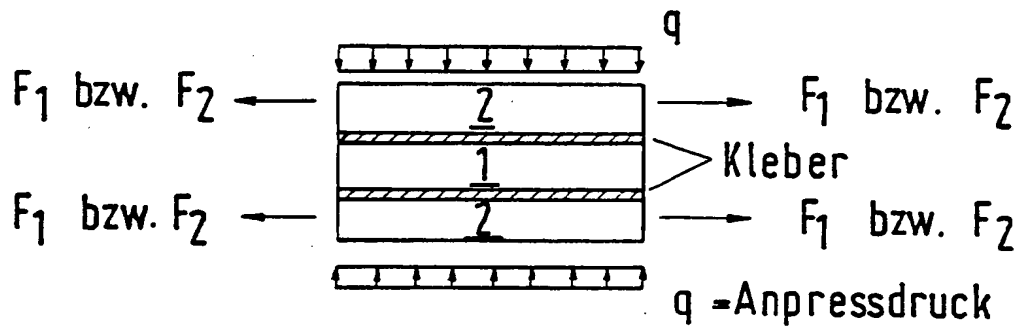


Fig.3



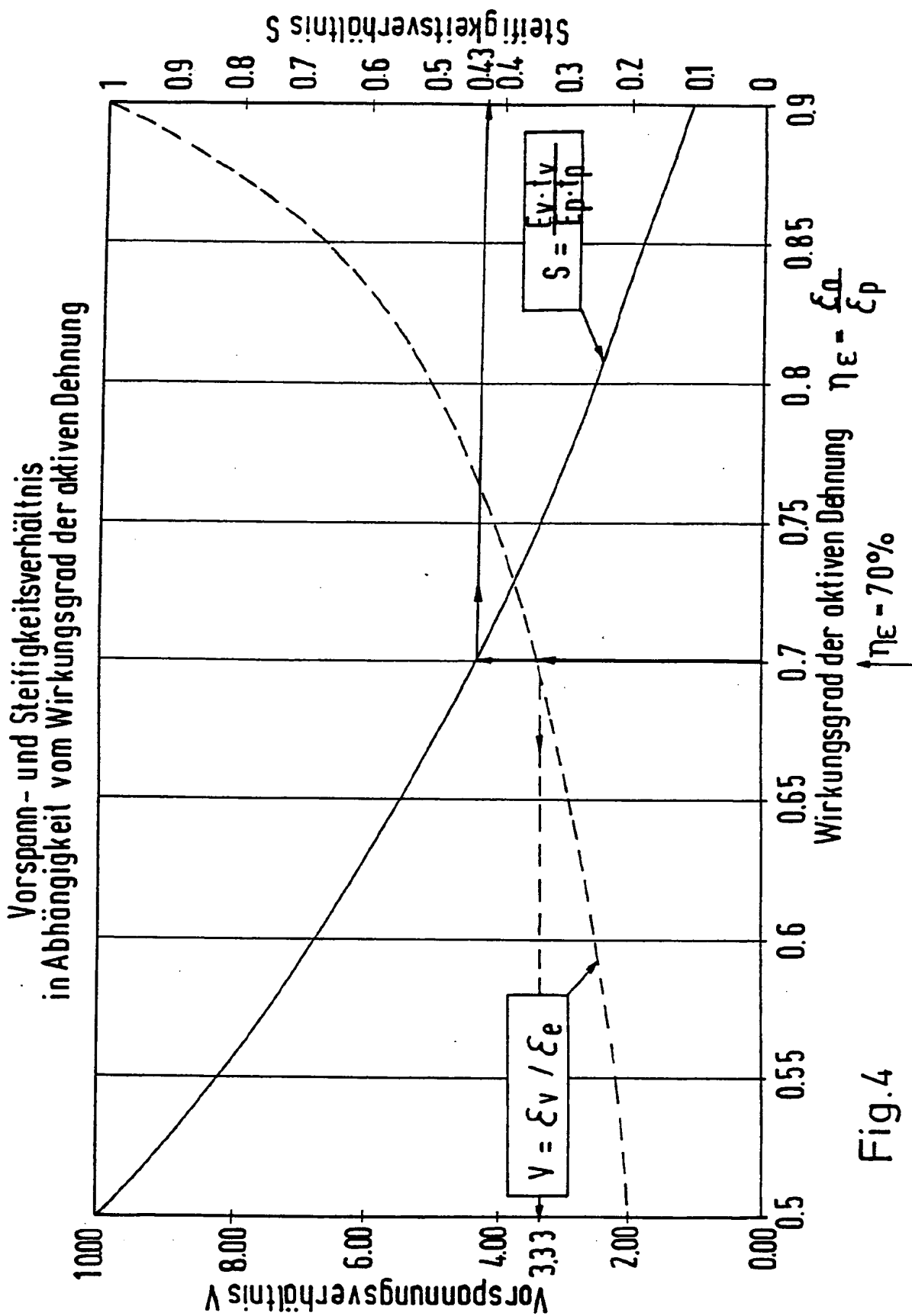


Fig. 4